

Х. Т. Йулдашев, З. Хайдаров, Ш. С. Касымов

## КИНЕТИКА ПРОБОЯ В СИСТЕМЕ «ПОЛУПРОВОДНИК — ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ ПРОМЕЖУТОК»

Ферганский политехнический институт, Узбекистан, 150107, Фергана, Ферганская ул., 86

Исследована кинетика пробоя в тонких газоразрядных зазорах с полупроводниковым электродом и влияние на неё перенапряжения в импульсном режиме. Показано, что подобная система позволяет дискриминировать фон оптического изображения в ионизационной фотографической системе. В качестве фотоприёмника использован полуизолирующий арсенид галлия, имеющий фотопроводимость в области длин волн 0,8–1,7 мкм. Толщина газоразрядного промежутка  $d_g \leq 0,1$  мм, давление воздуха в промежутке 38–228 мм рт. ст. В опытах использован источник питания в режиме постоянного напряжения и в импульсном режиме. Он позволял изменять величину напряжения в диапазоне 0–2,5·10<sup>3</sup> В. Импульсный генератор имел длительность импульса 5–2·10<sup>3</sup> мкс с амплитудой до 4·10<sup>3</sup> В — импульсы напряжения и тока в ионизационной системе регистрировали с помощью осциллографа С1-15. В качестве источника света использовали осветитель типа ОИ-24. Изменение интенсивности излучения, попадающего на вход системы, осуществлялось набором сеточных калиброванных фильтров. Рабочий диапазон спектра излучений и устранение фоновой засветки обеспечивались за счёт набора интерференционных и полупроводниковых светочувствительных фильтров. Библиогр. 10 назв. Ил. 6.

**Ключевые слова:** преобразователь изображений, полупроводниковый электрод, ионизационная камера, газоразрядный промежуток, полуизолирующий арсенид галлия, фотоприёмник, вольт-амперная характеристика, фототок, длительность импульса.

**Для цитирования:** Йулдашев Х. Т., Хайдаров З., Касымов Ш. С. Кинетика пробоя в системе «полупроводник — газоразрядный промежуток» // Вестник СПбГУ. Физика и химия. 2017. Т. 4 (62). Вып. 1. С. 16–22.

*Kh. T. Yuldashev, Z. Khaydarov, Sh. S. Kasymov*

## THE KINETICS OF THE BREAKDOWN IN THE SYSTEM OF “SEMICONDUCTOR — GAS DISCHARGE GAP”

Fergana Polytechnic Institute, 86, Ferganskaya ul., Fergana, 150107, Uzbekistan

The breakdown of kinetics was studied in thin gas-filled gaps with the semiconductor electrode and the influence of surge in a pulsed mode. It has been shown that such a system allows to discriminate background optical image in photographic ionization system. Semi-insulating gallium arsenide was used as a photo detector since it possessed photo conductance in the wavelength range of 0.8–1.7 μm. The gas discharge gap thickness was  $d_g \leq 0.1$  mm, the air pressure in the gap was 38–228 mm Hg. In the experiments we used a DC supply voltage, and pulsed mode. The power supply allows the host to change the value of the voltage in the range of 0–2.5·10<sup>3</sup> V. The pulse generator has a pulse duration of 5–2·10<sup>3</sup> μs with an amplitude of up to 4·10<sup>3</sup> V, and the voltage and current pulses in the ionization system — an oscilloscope C1-15. The light source used illuminator type OI-24. Changing the intensity of the radiation incident on the input of the system, carried out a set of calibrated mesh filters. The operating range of the spectrum of radiation, and the elimination of background illumination is provided by a set of interference filters and semiconductor. Refs 10. Figs 6.

**Keywords:** image convertor, semiconductor electrode, ionizing chamber, gas-filled gap, semi-insulating gallium arsenide, optical detector, current-voltage characteristic, photocurrent, pulse width.

**For citation:** Yuldashev Kh. T., Khaydarov Z., Kasymov Sh. S. The kinetics of the breakdown in the system of “semiconductor — gas discharge gap”. *Vestnik SPbSU. Physics and Chemistry*. 2017, vol. 4 (62), issue 1, pp. 16–22.

**Введение.** Газоразрядные системы с полупроводниковым электродом (SGD-структуры) остаются наиболее перспективными устройствами для регистрации оптических изображений в широком спектральном диапазоне [1–3]. Использование в этой системе принципа управляемой фоточувствительности [4] является основой для применения в инфракрасной фотографии. В настоящее время продолжаются работы по созданию современных приборов с высокими фотографическими параметрами [5–7].

Рассмотрим кинетику пробоя в ионизационной системе, представляющей собой газоразрядную плоскую ячейку с одним полупроводниковым электродом. Кинетика тока в такой ячейке и кинетика свечения разряда отчасти уже исследованы [8]. Установлено, что статистический разброс задержки пробоя при пренебрежимо малом сопротивлении электродов соответствует функции распределения экспоненциального типа, тогда как разброс при достаточно большой величине сопротивления полупроводникового электрода описывается функцией, близкой функции случайных ошибок [9].

В работе [10] исследуется влияние пробоя в узком газоразрядном промежутке с полупроводниковым электродом на его проводимость. Показано, что замена одного из металлических электродов на высокоомный полупроводник изменяет развитие процесса возникновения тока в узком газоразрядном зазоре при напряжениях, предшествующих напряжению пробоя. Система обладает памятью: пробой газа приводит к увеличению её проводимости в области от слабых до пробойных полей, когда  $U < U_{пр.}$

Проведённые в последнее время исследования вселяют надежду на то, что новый подход к плоской газоразрядной ячейке с полупроводниковым фоточувствительным электродом приведёт к созданию нового класса приборов. В наших будущих работах мы планируем показать, что изменение конфигурации и расположения элементов ячейки, а также применение новых фотоприёмников, позволяет создать уникальную фотографическую систему, а точнее — современный вид приборов ночного видения.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований явления в плоской газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом. Показаны возможности ограничения фона, который является препятствием для повышения контрастности выходного изображения, и в целом улучшения характеристик системы.

**Методика экспериментов.** Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Исследуемая газоразрядная система с полупроводниковым электродом включает полупроводниковый и прозрачный электроды, разделённые диэлектрической прокладкой с отверстием диаметром 15 мм, формирующие газоразрядную область. Толщина прокладки определяет значение  $d_g$ , которое изменялось в наших опытах в диапазоне 20–100 мкм. Полупроводниковый полуизолирующий электрод GaAs диаметром 25 мм и толщиной  $\sim 1$  мм служил также фотоприёмником устройства. На внешней стороне фотоприёмника расположен полупрозрачный электрический контакт, изготовленный методом напыления в вакууме тонкой плёнки металла (Ni). В качестве анода использовалась стеклянная пластина, покрытая проводящим слоем  $\text{SnO}_2$ .

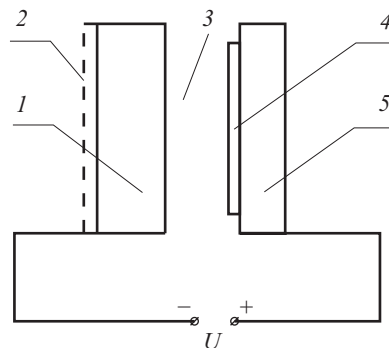


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:  
пояснения в тексте

Система состоит из полупроводниковой фоточувствительной пластины (1), снабжённой полупрозрачным электродом (2). Внутренняя поверхность пластины отделена от поверхности регистрирующего слоя (4) газовым зазором (3). Регистрирующий

слой (4) располагается на прозрачном проводящем контрэлектроде (5), выполненном из стеклянной пластинки, покрытой проводящей плёнкой  $\text{SnO}_2$ . При подключении к системе напряжения происходит пробой газового разряда, отличающийся тем, что в разрядной ячейке присутствует распределённое сопротивление полупроводника, способствующее демпфированию токовых неустойчивостей. Сопротивление полупроводника полностью определяет величину плотности тока по площади сечения и, таким образом, при освещении полупроводника можно управлять величиной и распределением тока в газовом зазоре.

**Результаты и обсуждение.** При подаче прямоугольного импульса напряжения на ячейку происходит пробой газа. Газ с одной стороны контактирует с полупроводниковым электродом, а с другой — с контрэлектродом. Импульсы тока в ячейке регистрируются осциллографом. По осциллограмме легко определить время задержки  $\theta$  импульса тока относительно момента включения напряжения. При этом важно отметить наличие заметного статистического разброса величины  $\theta$  относительно среднего значения.

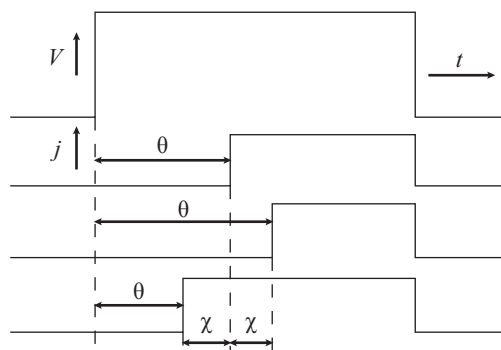


Рис. 2. Схема осциллограмм тока  $j$  пробоя при последовательно подаваемых импульсах напряжения  $V$

В полупроводниковой ионизационной камере сняты осциллограммы последовательных импульсов тока, иллюстрирующие характер проявления статистического разброса момента зажигания разряда (рис. 2).

Поскольку фотографическое действие на регистрирующую среду определяется величиной среднего количества электричества, нас интересовали не только значения заряда в каждом индивидуальном импульсе тока, но и средние значения заряда и тока за период. Поэтому первая экспериментальная задача состояла в определении среднего тока, вычисляемого для каждого момента по общему количеству импульсов за время экспонирования.

Действительно, принимая, что оптическая плотность почернения пропорциональна количеству импульсов для каждого момента времени, можно считать, что среднее значение тока в данный момент времени определяется соотношением

$$i_t = i_{\max} \frac{n}{N} = i_{\max} \frac{D}{D_{\max}}, \quad (1)$$

где  $n$  — количество токовых импульсов для данного времени задержки;  $N$  — полное число импульсов напряжения;  $D$  — оптическая плотность на осциллограмме, соответствующая числу импульсов для данного времени задержки ( $D \sim n$ );  $D_{\max}$  — максимальная оптическая плотность на осциллограмме, соответствующая полному числу импульсов ( $D_{\max} \sim N$ ).

При полном отсутствии статистического разброса средний заряд за время импульса напряжения определяется выражением

$$q_V = j(t_V - \theta) = \frac{V(t_V - \theta)}{R_6}, \quad (2)$$

где  $j$  — величина импульсного тока;  $V$  — величина импульсного напряжения;  $t_V$  — длительность импульса;  $R_6$  — балластное сопротивление системы. Величина среднего тока

за период  $T$  определяется выражением

$$i_T = \frac{qV}{T} = \frac{V}{R} (t_V - \theta)f, \quad (3)$$

где  $f$  — частота импульсов. С учётом статистического разброса времени задержки пробоя  $\chi$  выражение (3) можно переписать в виде

$$i_T = \frac{V}{R_0} \chi (t_V - \theta)f. \quad (4)$$

Приведённое выше соотношение устанавливает в первом приближении связь среднего тока за период от величины времени задержки пробоя  $\theta$  и статистического разброса задержки пробоя  $\chi$ .

Таким образом, общее время задержки определяется двумя составляющими: временем задержки ёмкости разрядного зазора через освещённый полупроводник и временем статистической задержки пробоя при данном напряжении в зазоре.

На рис. 3 показаны осциллограммы импульсов тока при величине зазора 100 мкм и давлении 76 мм. рт. ст. Интенсивность освещения ФП порядка  $5 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>. В верхней части осциллограммы показана форма импульса напряжения. Всплески на токовых осциллограммах обусловлены наличием ёмкости системы. На рисунке видно, что электрический пробой газоразрядного промежутка и установление тока происходят с некоторой временной задержкой  $\tau$  относительно приложенного напряжения, причём с увеличением  $U$   $\tau$  сокращается.

Рис. 3. Изменение времени формирования пробоя при увеличении питающего напряжения:

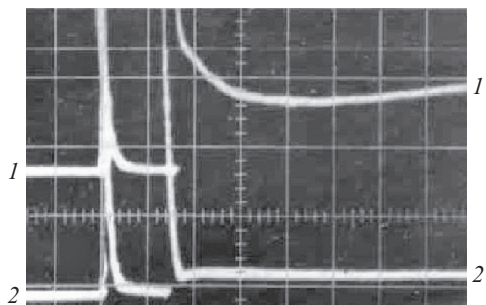
$J = 5 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>;  $P = 76$  мм. рт. ст.;  $d = 100$  мкм; 1 — форма импульса напряжения; 2, 3 — токовые осциллограммы;  $U$ , кВ: 2 — 1,5, 3 — 2,0



На рис. 4 приведены токовые осциллограммы, полученные для тех же значений  $P$  и  $d$ , но для разных интенсивностей света. Из этих данных следует, что изменение интенсивности падающего на ФП света не меняет величину  $\tau$ .

Рис. 4. Осциллограммы тока при различных интенсивностях освещения:

$P = 76$  мм. рт. ст.;  $d = 100$  мкм;  $U = 1,6$  кВ;  $J$ , Вт/см<sup>2</sup>: 1 —  $1,5 \cdot 10^{-3}$ ; 2 —  $10^{-3}$



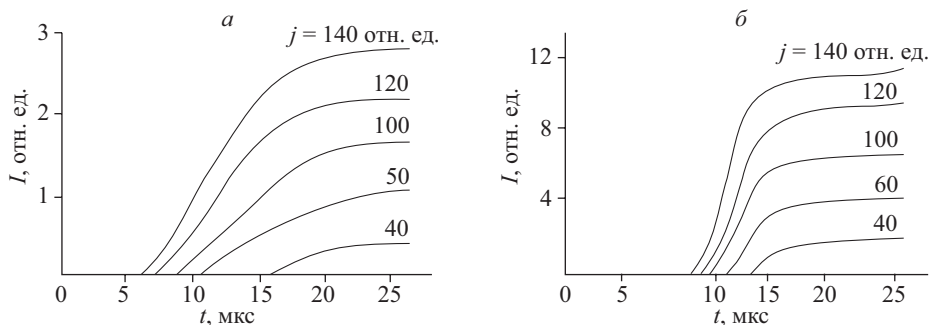


Рис. 5. Серия временных зависимостей среднего тока  $I$  в газоразрядной ячейке при разных значениях интенсивности освещения  $J$ :

$a$  — толщина газоразрядного промежутка  $d = 40$  мкм,  $b$  — 100 мкм

На рис. 5 приведены зависимости величины среднего тока при разных значениях освещённости полупроводника и одинаковых импульсах напряжения для каждой серии, полученные денситометрическим методом. Видно, что за время импульса напряжения (27 мкс) релаксационные кривые среднего тока стремятся к стационарному значению, величина которого зависит от освещения. Задержка пробоя, определённая как время достижения током половинной величины стационарного значения, и средняя величина разброса времени задержки пробоя уменьшаются с ростом освещённости.

На рис. 6 приведены зависимости среднего тока в импульсе от интенсивности света при разных значениях длительности импульса напряжения. Характерная особенность кривых — «пороговый» вид этих зависимостей, что является следствием эффекта задержки пробоя. При увеличении длительности импульса напряжения уменьшается пороговое значение интенсивности освещения, ниже которого ток проводимости в системе, а следовательно, и свечение разряда отсутствуют. Отметим также, что начиная с порогового значения, ток, а также прошедший заряд, резко возрастают с увеличением интенсивности света. Полученные «пороговые» зависимости среднего прошедшего количества электричества и величина среднего тока с регулированием величины порога представляют значительный интерес, являясь в принципе новым методом дискриминации фона. Подобная возможность динамической дискриминации фона, несомненно,

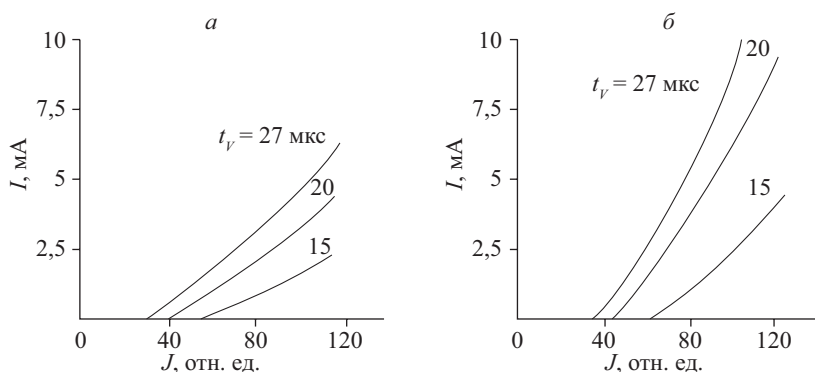


Рис. 6. Люксамперные характеристики системы при разных значениях длительности импульса напряжения при толщине зазора  $d = 40$  мкм ( $a$ ); 100 мкм ( $b$ )

реализуема в независимых газоразрядных ячейках с распределённым сопротивлением полупроводникового электрода в полупроводниковой фотографической системе ионизационного типа. Проведены исследования режима динамической дискриминации фона с фотографической регистрацией изображения при разных значениях задержки пробоя и разной освещённости отдельных участков площади полупроводникового фоточувствительного электрода.

**Заключение.** Экспериментально исследована кинетика пробоя газоразрядного промежутка при наличии фоточувствительного полупроводникового электрода. Показано, что величина времени задержки в этом случае определяется как естественным статистическим разбросом, связанным с перенапряжением, так и сопротивлением полупроводникового слоя, зависящим от его освещённости.

## Литература

1. *Йулдашев Х. Т., Касымов Ш. С., Хайдаров З.* Фотопреобразователь ИК-изображений со сверхтонкой газоразрядной ячейкой и люминофором // Прикл. физика. 2016. № 2. С. 94–99.
2. *Лодыгин А. Н., Порцель Л. М., Астров Ю. А.* Газовый разряд в аргоне и азоте при криогенной температуре в тонких зазорах // Письма в Журн. техн. физики. 2008. Т. 34, № 14. С. 61–66.
3. *Астров Ю. А., Лодыгин А. Н., Порцель Л. М.* Гексагональные структуры тока в системе «полупроводник — газоразрядный промежуток» // Журн. техн. физики. 2011. Т. 81, № 2. С. 42–47.
4. *Орбух В. И., Лебедева Н. Н., Саламов Б. Г.* Влияние поверхностной проводимости полупроводникового электрода на распределение газоразрядного тока // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43, вып. 10. С. 1329–1332.
5. *Хайдаров З., Йулдашев Х. Т.* Новый фотографический эффект в сверхтонкой газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом // Прикл. физика. 2016. № 5. С. 75–80.
6. *Лодыгин А. Н., Астров Ю. А., Порцель Л. М., Берегулин Е. В.* Динамика таунсендовского разряда в аргоне // Журн. техн. физики. 2015. Т. 85, № 5. С. 27–31.
7. *Йулдашев Х. Т., Касымов Ш. С.* Исследование фотоэлектрических и фотографических характеристик полупроводниковой фотографической системы ионизационного типа // ФИП. 2015. Т. 13, № 2. С. 141–148.
8. *Касымов Ш. С., Хайдаров З., Юлдашев Х. Т.* Электрические свойства чрезмерно тонкой газоразрядной ячейки с полупроводниковым электродом // Узб. физ. журн. 2012. № 4. С. 241–248.
9. *Касымов Ш. С., Хайдаров З., Хайдаров А. Х., Хомидов Т. Х., Юлдашев Н. Х.* О возможности дискриминации фона изображения в полупроводниковой фотографической системе ионизационного типа // Узб. науч.-техн. журн. 2012. № 1. С. 9–13.
10. *Лебедева Н. Н., Орбух В. И., Боброва Е. Ю.* О формировании низкоомного состояния газа над поверхностью полупроводникового электрода в предпробойном режиме // Вестн. Бакинск. гос. ун-та. 2005. № 5. С. 111–115.

## References

1. *Yuldashev Kh. T., Kasymov Sh. S., Khaidarov Z.* Fotopreobrazovatel' IK-izobrazhenii so sverkh-tonkoi gazorazriadnoi iacheikoi i liuminoform [Photoconverter of IR images with a sub-micron gas-filled cell and phosphor]. *Prikladnaia fizika [Plasma Physics Reports]*, 2016, no. 2, pp. 94–99. (In Russian)
2. *Lodygin A. N., Portsel' L. M., Astrov Iu. A.* Gazovyi razriad v argone i azote pri kriogennoi temperature v tonkikh zazorakh [Gas discharge in argon and nitrogen at cryogenic temperature in thin gaps]. *Pisma v Zhurn. tekhnicheskoi fiziki. [The technical Physics Letters]*, 2008, vol. 34, no. 14, pp. 61–66. (In Russian)
3. *Astrov Iu. A., Lodygin A. N., Portsel' L. M.* Geksagonal'nye struktury toka v sisteme "poluprovodnik — gazorazriadnyi promezhutok" [Hexagonal current structures in the system "semiconductor — the gas-discharge gap"]. *Zhurn. tekhnicheskoi fiziki [The technical Physics]*, 2011, vol. 81, no. 2, pp. 42–47. (In Russian)
4. *Orbukh V. I., Lebedeva N. N., Salamov B. G.* Vliianie poverkhnostnoi provodimosti poluprovodnikovogo elektroda na raspredelenie gazorazriadnogo toka [The effect of the surface conductivity of a semiconductor electrode on the distribution of gas-discharge current]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov [Physics and technology of semiconductors]*, 2009, vol. 43, iss. 10, pp. 1329–1332. (In Russian)

5. Khaidarov Z., Yuldashev Kh. T. Novyi fotograficheskii effekt v sverkh-tonkoi gazorazriadnoi iacheike s poluprovodnikovym elektrodom [A new positive photographic effect in the superthin gas discharge cell with a semiconductor electrode]. *Prikladnaia fizika* [*Plasma Physics Reports*], 2016, no. 5, pp. 75–80. (In Russian)
6. Lodygin A. N., Astrov Iu. A., Portsel' L. M., Beregunin E. V. Dinamika taunsendovskogo razriada v argone [Dynamics of the Townsend discharge in Argon]. *Zhurn. tekhnicheskoi fiziki* [*Technical Physics*], 2015, vol. 85, no. 5, pp. 27–31. (In Russian)
7. Iuldashev Kh. T., Kasymov Sh. S. Issledovanie fotoelektricheskikh i fotograficheskikh kharakteristik poluprovodnikovoi fotograficheskoi sistemy ionizatsionnogo tipa [Investigation of the photoelectric and photographic characteristics of a semiconductor photographic system of the ionization type]. *FIP*, 2015, vol. 13, no. 2, pp. 141–148. (In Russian)
8. Kasymov Sh. S., Khaidarov Z., Iuldashev Kh. T. Elektricheskie svoistva chrezmernno tonkoi gazorazriadnoi iacheiki s poluprovodnikovym elektrodom [Electrical properties of an excessively thin gas-discharge cell with a semiconductor electrode]. *Uzb. fiz. zhurn.* [*Uzbek Physical Journal*], 2012, no. 4, pp. 241–248. (In Russian)
9. Kasymov Sh. S., Khaidarov Z., Khaidarov A. Kh., Khomidov T. Kh., Iuldashev N. Kh. O vozmozhnosti diskriminatsii fona izobrazheniia v poluprovodnikovoi fotograficheskoi sisteme ionizatsionnogo tipa [On the possibility of image background discrimination in a semiconductor photographic system of the ionization type]. *Uzb. nauch.-tekhn. zhurn.* [*Uzbek Scientific and Technical Journal*], 2012, no. 1, pp. 9–13. (In Russian)
10. Lebedeva N. N., Orbukh V. I., Bobrova E. Iu. O formirovanii nizkoomnogo sostoiianiia gaza nad poverkhnost'iu poluprovodnikovogo elektroda v predprobnoim rezhime [On the formation of a low-resistance state of gas above the surface of a semiconductor electrode in the pre-breakdown regime]. *Vestn. Bakins. gos. un-ta* [*Vestn. of Baku State University*], 2005, no. 5, pp. 111–115. (In Russian)

Статья поступила в редакцию 27 сентября 2016 г.

#### Контактная информация

*Йўлдашев Хуришиджон Толибович* — ассистент; e-mail: hurshid5704@mail.ru

*Хайдаров Зокиржон* — кандидат физико-математических наук, доцент; e-mail: hurshid5704@mail.ru

*Касымов Шавкат Сулейманович* — кандидат физико-математических наук, доцент;

e-mail: hurshid5704@mail.ru

*Yuldashev Khurshid T.* — Assistant Professor; e-mail: hurshid5704@mail.ru

*Khaydarov Zokirjon* — PhD, Associate Professor; e-mail: hurshid5704@mail.ru

*Kasymov Shavkat S.* — PhD, Associate Professor; e-mail: hurshid5704@mail.ru